МЕХАНИКА
MECHANICS







УДК 531.132.1
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-204-213

Научная статья

Применение блока инерциальных датчиков для оценивания положения и управления движением экзоскелета нижних конечностей

Г. Р. Сайпулаев✉, **М. Р. Сайпулаев**, **И. В. Меркурьев**, **Б. И. Адамов**, **Р. Б. Гарсиа**
Национальный исследовательский университет «МЭИ», Российская Федерация, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14
✉ saypulaevgr@mail.ru

Аннотация

Введение. Исследуется задача управления движением экзоскелета нижних конечностей. Для ее решения предлагается задействовать программное управление и управление в виде обратной связи. Формирование управления в виде обратной связи требует оценки состояния экзоскелета (углы поворота, угловые скорости и ускорения звеньев). Рассматривается возможность применения блока инерциальных датчиков для оценки угловых скоростей и ускорений звеньев экзоскелета. Цель работы — определить законы формирования управления движением экзоскелета, которые обеспечат устойчивость программного движения и будут использовать измерения энкодеров, микромеханических гироскопов и акселерометров.

Материалы и методы. Ранее выполненное математическое моделирование динамики экзоскелета задействовали при формировании программного управления. Предложили оснастить экзоскелет блоками инерциальных датчиков. Это решение позволяет оценивать вектор состояния экзоскелета и использовать данные оценки в цепи обратной связи. Описали математическую модель измерений указанных датчиков. Предложенный вариант пригоден для систем управления трехзвенными экзоскелетами нижних конечностей и может быть расширен для многозвенных.

Результаты исследования. Предложены новые законы управления движением экзоскелета, основанные на математической модели динамики системы и использующие измерительную информацию с энкодеров и инерциальных датчиков. В математическом пакете Wolfram Mathematica выполнено численное моделирование движения экзоскелета. Его итоги подтвердили работоспособность предложенного управления и возможность использования блока инерциальных датчиков для оценки состояния экзоскелета. Приводятся результаты численного моделирования для следующих программных движений: подъем экзоскелета из положения сидя в вертикальное и стабилизация вертикального положения равновесия.

Обсуждение и заключения. Предлагаемое управление применимо в экзоскелетах для медицинских приложений (например, в задаче вертикализации пациентов с нарушениями функций опорно-двигательного аппарата). Показана возможность использования измерительной информации, полученной от блоков инерциальных датчиков, в задаче оценки состояния звеньев экзоскелета. Применение инерциальных датчиков позволит определять угловое ускорение звеньев экзоскелета, избегая численного дифференцирования измерительной информации, полученной от энкодеров. Оценки углового ускорения позволяют вводить в систему управления обратную связь по угловым ускорениям, что открывает возможность улучшить переходные процессы при управлении движением экзоскелета.

Ключевые слова: экзоскелет, математическая модель, инерциальные датчики, управление, оценка состояния.

Финансирование. Исследование проводилось в рамках проекта «Разработка макетного образца активного экзоскелета на базе электрогидропневмопривода, увеличивающего физические способности человека и качество процессов управления движением» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программ научных исследований «Энергетика», «Электроника, радиотехника и IT» и «Технологии индустрии 4.0 для промышленности и робототехники» в 2020–2022 гг.

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их совершенствованию способствовали значительному повышению качества настоящей статьи.

Для цитирования. Применение блока инерциальных датчиков для оценивания положения и управления движением экзоскелета нижних конечностей / Г. Р. Сайпулаев, М. Р. Сайпулаев, И. В. Меркурьев [и др.] // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 3. — С. 204–213. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-204-213

Original article

Application of an Inertial Sensor Unit for Position Estimation and Motion Control of the Lower-Extremity Powered Exoskeleton

Gasan R. Saypulaev, **Musa R. Saypulaev**, **Igor V. Merkuryev**, **Boris I. Adamov**, **Roilan B. Garcia**
National Research University (MPEI), 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow, Russian Federation
✉ saypulaevgr@mail.ru

Abstract
Introduction. The problem of controlling the lower-extremity powered exoskeleton motion was investigated. To solve it, it was proposed to use a program control and feedback control. The formation of control in the form of feedback required an assessment of the state of the exoskeleton (rotation angles, angular velocities, and accelerations of the links). The possibility of using an inertial measuring unit to estimate angular velocities and accelerations of exoskeleton links was considered. The work objective was to develop laws for the formation of the exoskeleton motion control, which could provide the stability of the program motion and use the measurements of encoders, micromechanical gyroscopes and accelerometers.
Materials and Methods. Previously performed mathematical modeling of the exoskeleton dynamics was used to form a program control. It was proposed to equip the exoskeleton with inertial sensor units. This solution made it possible to evaluate the state vector of the exoskeleton and to use these estimates in a feedback loop. A mathematical model of measurements of these sensors was described. The proposed version is suitable for control systems of three-link exoskeletons of the lower extremities and can be expanded to the case of multi-link exoskeleton designs.
Results. New laws of exoskeleton motion control based on a mathematical model of the system dynamics and using measurement information from encoders and inertial information sensors were proposed. Numerical simulation of exoskeleton motion was performed in the Wolfram Mathematica mathematical package. Its results confirmed the operability of the proposed control and the possibility of using an inertial sensor unit to assess the exoskeleton state. The numerical simulation results for the following program movements were presented: lifting the exoskeleton from a sitting position to a vertical position, and stabilization of the vertical equilibrium position.
Discussion and Conclusions. The proposed control can be applied in exoskeletons for medical purposes, e.g., in the task of verticalization of patients with dysfunctions of the musculoskeletal system. The possibility of using measurement information obtained from inertial measurements units in the problem of estimating the state of exoskeleton links was demonstrated. The use of inertial sensors will make it possible to determine the angular acceleration of the exoskeleton links, avoiding numerical differentiation of the measurement information received from the encoders. The obtained estimates of angular acceleration allow us to introduce feedback on angular accelerations into the control system, which opens up the possibility of improving transients in controlling the exoskeleton motion.

Keywords: exoskeleton, mathematical model, inertial sensors, control, state estimation.

Funding information. The research was carried out within the framework of the project “Development of a prototype of an active exoskeleton based on an electrohydropneumatic actuator that increases human physical abilities and the quality of motion control processes”. It was supported by the grant from the National Research University (MPEI) for the implementation of research programs “Power Engineering”, “Electronics, Radio Engineering, and IT”, and “Industry 4.0 Technologies for Manufacturing and Robotics” in 2020–2022.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to reviewers, whose critical assessment of the submitted materials and suggestions for their improvement contributed significantly to the quality of this article.

For citation. G. R. Saypulaev, M. R. Saypulaev, I. V. Merkuryev, B. I. Adamov, R. B. Garcia. Application of an Inertial Sensor Unit for Position Estimation and Motion Control of the Lower-Extremity Powered Exoskeleton. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 204–213. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-204-213

Введение. Разработка и применение экзоскелетов — устройств, предназначенных для облегчения движения и повышения двигательной эффективности человека, — перспективное направление развития робототехники.

Экзоскелеты все шире применяются в промышленности [1], военном деле [2], медицине [3] и других областях. Этим обусловлена актуальность исследований, посвященных их схемотехническому и конструкционному исполнению, оптимизации энергозатрат, траектории движения, динамике, управлению.

В представленной работе рассматривается активный экзоскелет нижних конечностей человека с жесткой конструкцией силового каркаса. Его используют для реабилитации пациентов с нарушениями функций опорно-двигательного аппарата.

При разработке таких экзоскелетов возникает необходимость решения взаимосвязанных научно-технических задач. В их числе:

– формирование скелетной схемы;

– математическое моделирование движения экзоскелета [4–6];

– оптимизация движения звеньев на основе математической модели кинематики и динамики[1];

– рациональное построение двигательной системы [7, 8];

– разработка алгоритмов управления [9–11] и оценивания [13, 14].

Все перечисленные задачи связывает проблема поиска управляющих воздействий для программного движения. Их источником может быть, во-первых, динамическая модель системы. Во-вторых, они формируются в виде пропорционального интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора, используемого для стабилизации программного движения. Возможна также комбинация двух способов. При этом для формирования управления по принципу обратной связи (в частности в виде ПИД регулятора) важную роль играют алгоритмы оценивания состояния динамической системы и набор датчиков, показатели которых используются в алгоритмах.

Для получения информации о положении звеньев экзоскелетов их оснащают энкодером или гироскопом [9–14]. Другие возможные варианты: акселерометр, магнитометр, потенциометр, датчики момента, силы, биосигналов и др.

В [13] на каждом звене экзоскелета предлагается использовать по одному блоку инерциальных датчиков, состоящих из гироскопов и акселерометров. Такое решение позволит оценивать углы поворота, угловые скорости и ускорения. При этом модель измерений получается нелинейной, что усложняет структуру систем управления и наблюдения.

Цель работы — улучшение управления экзоскелетом за счет использования двух инерциальных блоков, закрепленных на каждом звене экзоскелета. Такой подход позволяет оценивать углы поворота, угловые скорости и ускорения экзоскелета. С помощью предлагаемого варианта расположения гироскопов и акселерометров можно получить линейную модель измерений, что откроет пути для упрощения системы управления и применения теории оптимального оценивания линейных систем [15]. Это, в свою очередь, станет базой для совершенствования управления движением экзоскелета. Критерий улучшения качества управления — уменьшение отклонений угловых скоростей звеньев от программного движения.

Материалы и методы. Рассмотрим кинематическую схему экзоскелета с жесткой конструкцией силового каркаса при симметричном движении ног в сагиттальной плоскости (рис. 1).

[1] Оптимизация времени вертикализации экзоскелета по критерию энергоэффективности / С. Ф. Яцун [и др.] // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины. Курск : Изд-во Юго-Зап. гос. ун-та, 2016. Ч. 2. С. 151–160.

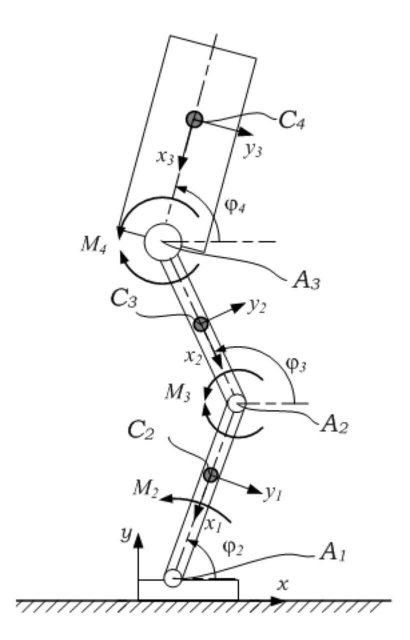


Рис. 1. Кинематическая схема экзоскелета нижних конечностей в сагиттальной плоскости

C_2, C_3, C_4 — центры масс голеней, бедер и корпуса соответственно; A_1, A_2, A_3 — шарниры, соединяющие звенья экзоскелета; φ_2, φ_3, φ_4 — углы поворота звеньев экзоскелета; M_2, M_3, M_4 — управляющие моменты, создаваемые приводами, расположенными в шарнирах A_1, A_2, A_3 соответственно. Для описания движения вводится система координат xyz. Ось x направлена вдоль опорной поверхности, y — вдоль местной вертикали к опорной поверхности. Ось z дополняет координатные оси до правой декартовой системы координат.

В качестве основы для построения системы управления движением экзоскелета используем динамическую модель из [6].

$$A(q)\ddot{q} + F(q)\dot{q}^2 + D\dot{q} + P(q) = M. \quad (1)$$

Здесь:

$$A(q) = \begin{pmatrix} J_{22} & J_{23}\cos(\varphi_2 - \varphi_3) & J_{24}\cos(\varphi_2 - \varphi_4) \\ J_{23}\cos(\varphi_2 - \varphi_3) & J_{33} & J_{34}\cos(\varphi_3 - \varphi_4) \\ J_{24}\cos(\varphi_2 - \varphi_4) & J_{34}\cos(\varphi_3 - \varphi_4) & J_{44} \end{pmatrix}$$ — матрица инерционных сил;

$$F(q) = \begin{pmatrix} 0 & J_{23}\sin(\varphi_2 - \varphi_3) & J_{24}\sin(\varphi_2 - \varphi_4) \\ -J_{23}\sin(\varphi_2 - \varphi_3) & 0 & J_{34}\sin(\varphi_3 - \varphi_4) \\ -J_{24}\sin(\varphi_2 - \varphi_4) & -J_{34}\sin(\varphi_3 - \varphi_4) & 0 \end{pmatrix}$$ — матрица скоростных сил;

$D = \mathrm{diag}(\mu_2, \mu_3, \mu_4)$ — диагональная матрица диссипативных сил, характеризующих линейное трение в шарнирах; $P(q) = \begin{pmatrix} M_{G2}\cos\varphi_2 & M_{G3}\cos\varphi_3 & M_{G4}\cos\varphi_4 \end{pmatrix}^T$ — вектор-столбец моментов, возникающих от действия сил тяжести; $M = \begin{pmatrix} M_2 - M_3 & M_3 - M_4 & M_4 \end{pmatrix}^T$ — вектор-столбец управляющих моментов, создаваемых приводами, которые расположены в шарнирах звеньев экзоскелета; $q = \begin{pmatrix} \varphi_2 & \varphi_3 & \varphi_4 \end{pmatrix}^T$ — вектор-столбец обобщенных координат, состоящий из углов поворота звеньев экзоскелета; $J_{jk}\ (j,k = 2,3,4)$ — моменты инерции звеньев экзоскелета; $\mu_k\ (k = 2,3,4)$ — коэффициенты линейного трения в шарнирах звеньев экзоскелета; $M_{Gk}\ (k = 2,3,4)$ — максимальные величины моментов гравитационных сил, воспринимаемые выходными звеньями приводов.

Пусть заданы законы изменения углов и их производные при программном движении:

$$\varphi_i^P = \varphi_i^P(t), \quad \dot{\varphi}_i^P = \dot{\varphi}_i^P(t), \quad \ddot{\varphi}_i^P = \ddot{\varphi}_i^P(t). \quad (i = 2,3,4). \quad (2)$$

Для управления движением экзоскелета предлагается формировать управляющие воздействия в виде суммы управляющих моментов:

– при программном управлении $M_i^P = M_i\left(\varphi_i^P, \dot{\varphi}_i^P, \ddot{\varphi}_i^P\right) \quad (i = 2,3,4)$;

Механика

– ПИД регулятора $M_i^{PID} = M_i\left(\varphi_i^P - \varphi_i, \dot{\varphi}_i^P - \dot{\varphi}_i, \ddot{\varphi}_i^P - \ddot{\varphi}_i\right), (i = 2,3,4)$.

$$M_2 = M_2^P + M_2^{PID}, \quad M_3 = M_3^P + M_3^{PID}, \quad M_4 = M_4^P + M_4^{PID}. \tag{3}$$

Для программного управления значения управляющих воздействий M_i^P можно рассчитать по формулам [7]:

$$\begin{aligned}
M_4^P &= M_{G4}\cos\varphi_4^P + \mu_4\dot{\varphi}_4^P + J_4\ddot{\varphi}_4^P + J_{24}\left[\ddot{\varphi}_2^P\cos\left(\varphi_2^P - \varphi_4^P\right) - \left(\dot{\varphi}_2^P\right)^2\sin\left(\varphi_2^P - \varphi_4^P\right)\right] + \\
&+ J_{34}\left[\ddot{\varphi}_3^P\cos\left(\varphi_3^P - \varphi_4^P\right) - \left(\dot{\varphi}_3^P\right)^2\sin\left(\varphi_3^P - \varphi_4^P\right)\right], \\
M_3^P &= M_{G3}\cos\varphi_3^P + \mu_3\dot{\varphi}_3^P + J_3\ddot{\varphi}_3^P + J_{23}\left[\ddot{\varphi}_2^P\cos\left(\varphi_2^P - \varphi_3^P\right) - \left(\dot{\varphi}_2^P\right)^2\sin\left(\varphi_2^P - \varphi_3^P\right)\right] + \\
&+ J_{34}\left[\ddot{\varphi}_4^P\cos\left(\varphi_3^P - \varphi_4^P\right) + \left(\dot{\varphi}_4^P\right)^2\sin\left(\varphi_3^P - \varphi_4^P\right)\right] + M_4^P, \\
M_2^P &= M_{G2}\cos\varphi_2^P + \mu_2\dot{\varphi}_2^P + J_2\ddot{\varphi}_2^P + J_{23}\left[\ddot{\varphi}_3^P\cos\left(\varphi_2^P - \varphi_3^P\right) + \left(\dot{\varphi}_3^P\right)^2\sin\left(\varphi_2^P - \varphi_3^P\right)\right] + \\
&+ J_{24}\left[\ddot{\varphi}_4^P\cos\left(\varphi_2^P - \varphi_4^P\right) + \left(\dot{\varphi}_4^P\right)^2\sin\left(\varphi_2^P - \varphi_4^P\right)\right] + M_3^P.
\end{aligned} \tag{4}$$

Величины M_i^{PID} вычисляются по принципу обратной связи (в форме ПИД регулятора):

$$\begin{aligned}
M_4^{PID} &= K_{D4}\frac{d}{dt}\left(\dot{\varphi}_4^P - \dot{\varphi}_4\right) + K_{P4}\left(\dot{\varphi}_4^P - \dot{\varphi}_4\right) + K_{I4}\int_0^t\left(\dot{\varphi}_4^P(t_1) - \dot{\varphi}_4(t_1)\right)dt_1, \\
M_3^{PID} &= K_{D3}\frac{d}{dt}\left(\dot{\varphi}_3^P - \dot{\varphi}_3\right) + K_{P3}\left(\dot{\varphi}_3^P - \dot{\varphi}_3\right) + K_{I3}\int_0^t\left(\dot{\varphi}_3^P(t_1) - \dot{\varphi}_3(t_1)\right)dt_1 + M_4^{PID}, \\
M_2^{PID} &= K_{D2}\frac{d}{dt}\left(\dot{\varphi}_2^P - \dot{\varphi}_2\right) + K_{P2}\left(\dot{\varphi}_2^P - \dot{\varphi}_2\right) + K_{I2}\int_0^t\left(\dot{\varphi}_2^P(t_1) - \dot{\varphi}_2(t_1)\right)dt_1 + M_3^{PID},
\end{aligned} \tag{5}$$

или

$$\begin{aligned}
M_4^{PID} &= K_{D4}\left(\ddot{\varphi}_4^P - \ddot{\varphi}_4\right) + K_{P4}\left(\dot{\varphi}_4^P - \dot{\varphi}_4\right) + K_{I4}\left(\varphi_4^P - \varphi_4\right), \\
M_3^{PID} &= K_{D3}\left(\ddot{\varphi}_3^P - \ddot{\varphi}_3\right) + K_{P3}\left(\dot{\varphi}_3^P - \dot{\varphi}_3\right) + K_{I3}\left(\varphi_3^P - \varphi_3\right) + M_4^{PID}, \\
M_2^{PID} &= K_{D2}\left(\ddot{\varphi}_2^P - \ddot{\varphi}_2\right) + K_{P2}\left(\dot{\varphi}_2^P - \dot{\varphi}_2\right) + K_{I2}\left(\varphi_2^P - \varphi_2\right) + M_3^{PID}.
\end{aligned} \tag{6}$$

Здесь коэффициенты ПИД регулятора K_{Pi}, K_{it}, K_{Di} (i = 2, 3, 4) могут быть:

– постоянными (их находят из условий устойчивости);

– функциями времени (находят из решения задач оптимального управления) [9, 13].

Одна из проблем формирования управляющих воздействий в виде ПИД регулятора — возможные погрешности при дифференцировании измерительной информации. Чтобы их избежать, используем:

– энкодеры (для измерения текущих углов поворота φ_i звеньев экзоскелета);

– блоки инерциальных датчиков из микромеханических гироскопов (для измерения угловых скоростей $\dot{\varphi}_i$) и акселерометров (для оценки угловых скоростей $\dot{\varphi}_i$ и ускорений $\ddot{\varphi}_i$).

Модель измерений углов поворота с помощью энкодеров можно представить в виде:

$$\varphi_{E2} = \varphi_2, \quad \varphi_{E3} + \varphi_{E2} = \varphi_3, \quad \varphi_{E4} + \varphi_{E3} + \varphi_{E2} = \varphi_4, \tag{7}$$

где $\varphi_{E2}, \varphi_{E3}, \varphi_{E4}$ — показания энкодеров, расположенных в шарнирах A_1, A_2, A_3 (рис. 1).

Модель измерений угловых скоростей с помощью микромеханических гироскопов можно записать в виде:

$$\Omega_{G2} = \dot{\varphi}_2, \quad \Omega_{G3} = \dot{\varphi}_3, \quad \Omega_{G4} = \dot{\varphi}_4, \tag{8}$$

где Ω_{G2}, Ω_{G3}, Ω_{G4} — показания гироскопов, закрепленных на звеньях экзоскелета.

Для оценки угловых скоростей и ускорений с помощью акселерометров можно использовать по два двухосевых акселерометра, которые расположены на противоположных концах каждого из звеньев. Они измеряют в проекциях на оси $x_i y_i$ (i = 1, 2, 3) кажущиеся ускорения, связанные с соответствующими звеньями.

$$f_{A_1A_2}^{A_2}-f_{A_1A_2}^{A_1}=\left(\left(f_{A_1A_2}^{A_2}-f_{A_1A_2}^{A_1}\right)_{x_1}\quad\left(f_{A_1A_2}^{A_2}-f_{A_1A_2}^{A_1}\right)_{y_1}\right)^T=\left(l_1\dot{\varphi}_2^2\quad -l_1\ddot{\varphi}_2\right)^T,$$
$$f_{A_2A_3}^{A_3}-f_{A_2A_3}^{A_2}=\left(\left(f_{A_2A_3}^{A_3}-f_{A_2A_3}^{A_2}\right)_{x_2}\quad\left(f_{A_2A_3}^{A_3}-f_{A_2A_3}^{A_2}\right)_{y_2}\right)^T=\left(l_2\dot{\varphi}_3^2\quad -l_2\ddot{\varphi}_3\right)^T,\qquad(9)$$
$$f_{A_3C}^{C}-f_{A_3C}^{A_3}=\left(\left(f_{A_3C}^{C}-f_{A_3C}^{A_3}\right)_{x_3}\quad\left(f_{A_3C}^{C}-f_{A_3C}^{A_3}\right)_{y_3}\right)^T=\left(l_3\dot{\varphi}_4^2\quad -l_3\ddot{\varphi}_4\right)^T.$$

Здесь $f_{A_1A_2}^{A_1}, f_{A_1A_2}^{A_2}$ — векторы показаний двухосевых акселерометров, закрепленных на звене A_1A_2 и расположенных в точках A_1 и A_2 соответственно; $f_{A_2A_3}^{A_2}, f_{A_2A_3}^{A_3}$ — векторы показаний двухосевых акселерометров, закрепленных на звене A_2A_3 и расположенных в точках A_2 и A_3 соответственно; $f_{A_3C}^{A_3}, f_{A_3C}^{C}$ — векторы показаний двухосевых акселерометров, закрепленных на звене A_3C и расположенных в точках A_3 и C соответственно; $l_1=|A_1A_2|, l_2=|A_2A_3|, l_3=|A_3C|$ — расстояния между парами акселерометров, закрепленных на звеньях A_1A_2, A_2A_3 и A_3C соответственно.

Объединим уравнения (7)–(9) и запишем формулы для оценки углов поворота, угловых скоростей и ускорений:

$$\varphi_2=\varphi_{E2},\quad \varphi_3=\varphi_{E3}+\varphi_{E2},\quad \varphi_4=\varphi_{E4}+\varphi_{E3}+\varphi_{E2},\quad \dot{\varphi}_2=\Omega_{G2},\quad \dot{\varphi}_3=\Omega_{G3},\quad \dot{\varphi}_4=\Omega_{G4},$$
$$\ddot{\varphi}_2=-\frac{\left(f_{A_1A_2}^{A_2}-f_{A_1A_2}^{A_1}\right)_{y_1}}{l_1},\quad \ddot{\varphi}_3=-\frac{\left(f_{A_2A_3}^{A_3}-f_{A_2A_3}^{A_2}\right)_{y_2}}{l_2},\quad \ddot{\varphi}_4=-\frac{\left(f_{A_3C}^{C}-f_{A_3C}^{A_3}\right)_{y_3}}{l_3}.\qquad(10)$$

Для коррекции оценок модулей угловых скоростей можно использовать уравнения:

$$\left(f_{A_1A_2}^{A_2}-f_{A_1A_2}^{A_1}\right)_{x_1}=l_1\dot{\varphi}_2^2,\quad \left(f_{A_2A_3}^{A_3}-f_{A_2A_3}^{A_2}\right)_{x_2}=l_2\dot{\varphi}_3^2,\quad \left(f_{A_3C}^{C}-f_{A_3C}^{A_3}\right)_{x_3}=l_3\dot{\varphi}_4^2.\qquad(11)$$

Таким образом, для оценки углов поворота, угловых скоростей и угловых ускорений звеньев экзоскелета можно обработать измерения фильтром скользящего среднего, алгоритмом фильтра Калмана и др. [10, 13, 15].

В самом простом варианте замыкания цепи обратной связи при формировании управления получим выражения для управляющих моментов:

$$M_4=M_4^P+K_{D4}\left(\ddot{\varphi}_4^P+\frac{\left(f_{A_3C}^{C}-f_{A_3C}^{A_3}\right)_{y_3}}{l_3}\right)+K_{P4}\left(\dot{\varphi}_4^P-\Omega_{G4}\right)+K_{I4}\left(\varphi_4^P-\varphi_{E4}-\varphi_{E3}-\varphi_{E2}\right),$$
$$M_3=M_3^P+K_{D3}\left(\ddot{\varphi}_3^P+\frac{\left(f_{A_2A_3}^{A_3}-f_{A_2A_3}^{A_2}\right)_{y_2}}{l_2}\right)+K_{P3}\left(\dot{\varphi}_3^P-\Omega_{G3}\right)+K_{I3}\left(\varphi_3^P-\varphi_{E3}-\varphi_{E2}\right)+M_4^{PID},\qquad(12)$$
$$M_2=M_2^P+K_{D2}\left(\ddot{\varphi}_2^P+\frac{\left(f_{A_1A_2}^{A_2}-f_{A_1A_2}^{A_1}\right)_{y_1}}{l_1}\right)+K_{P2}\left(\dot{\varphi}_2^P-\Omega_{G2}\right)+K_{I2}\left(\varphi_2^P-\varphi_{E2}\right)+M_3^{PID}.$$

Введение в систему управления обратной связи по угловым ускорениям позволяет применить диагонализацию матрицы инерционных сил для снижения перекрестного влияния между обобщенными координатами.

Смоделируем движения экзоскелета для проверки работоспособности предложенного закона управления. В качестве программного движения рассмотрим:

– смену положения из сидячего в стоячее [7];

– стабилизацию вертикального положения экзоскелета при начальных отклонениях звеньев от вертикали.

Результаты исследования. Для численного моделирования системы возьмем параметры математической модели экзоскелета из [6, 7]. Рассмотрим частный случай, выбрав одинаковые коэффициенты ПИД регулятора для каждого привода: $K_{Pi}=1000$ Н·м·с, $K_{Ii}=1000$ Н·м, $K_{Di}=0$ Н·м/с $(i=2,3,4)$.

На рис. 2 приведены зависимости от времени для углов поворота и угловых скоростей звеньев экзоскелета. Их получили при управляющих моментах, соответствующих подъему из положения сидя. Как видно из рис. 2 *а*, по окончании движения углы поворота каждого звена равны $\varphi_2=\varphi_3=\varphi_4=90°$, что соответствует стоянию.

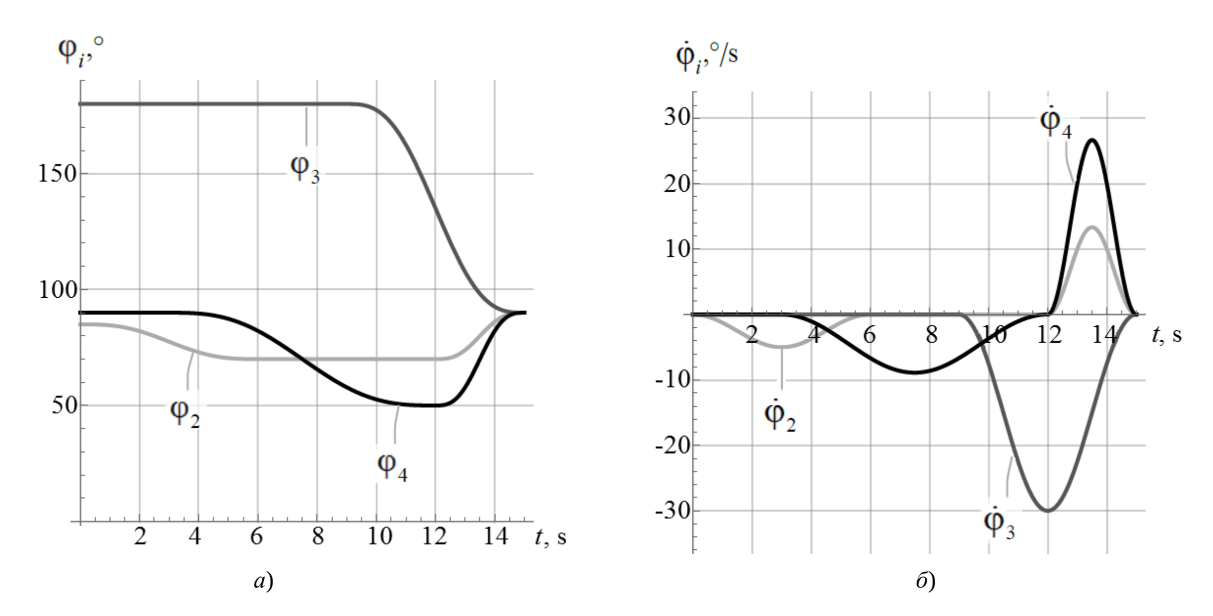


Рис. 2. Результаты моделирования подъема из положение сидя без начальных отклонений от программного движения в углах поворота звеньев экзоскелета: *а* — углы поворота звеньев; *б* — угловые скорости звеньев

Теперь рассмотрим случай с отклонениями около 20° в углах поворота звеньев по сравнению с начальным положением, заданным в программном движении. Результаты моделирования подъема из положения сидя приведены на рис. 3. Как и на рис. 2, по окончании времени движения значения углов поворота равны $\varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4 = 90°$. Следовательно, использование комбинации программного управления и управления в виде ПИД регулятора точно приводит экзоскелет к требуемому положению.

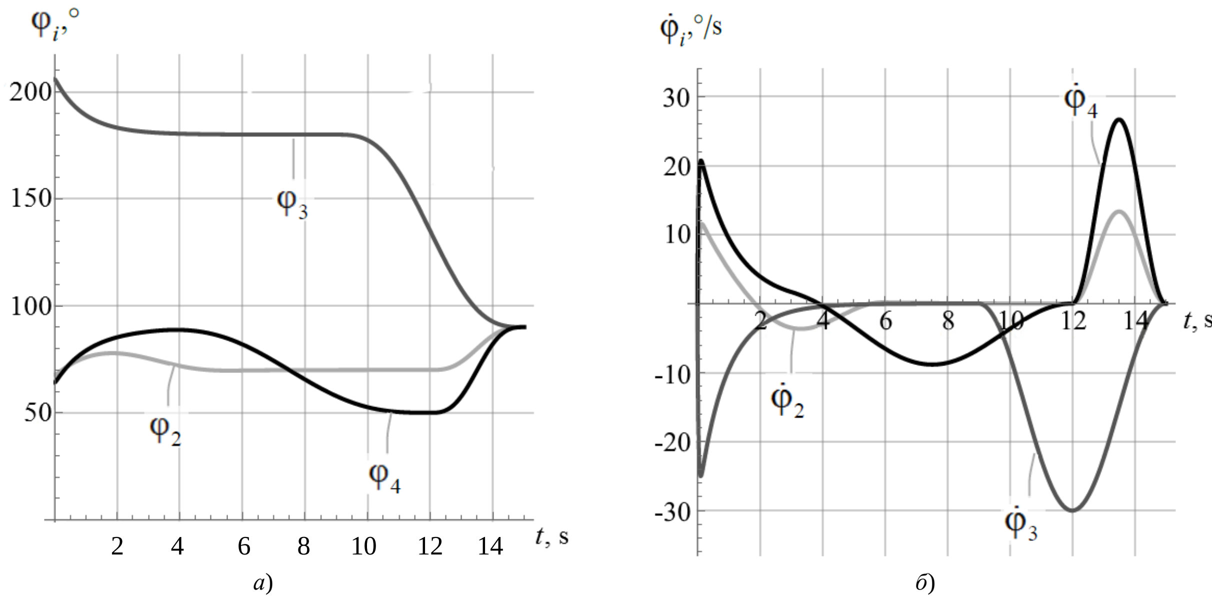


Рис. 3. Результаты моделирования подъема из положения сидя при начальных отклонениях от программного движения в углах поворота звеньев экзоскелета: *а* — углы поворота звеньев; *б* — угловые скорости звеньев

Таким образом, при моделировании программного движения показана работоспособность предложенного закона формирования управляющих воздействий, описанного в (4) и (12).

Вертикальное положение экзоскелета неустойчиво без управления, поэтому возмущающие факторы могут обусловить отклонения от равновесия вплоть до падения экзоскелета.

Проверим работоспособность предложенного управления в задаче стабилизации вертикального положения экзоскелета. Значения для программного движения: $\varphi_2^d(t) = \varphi_3^d(t) = \varphi_4^d(t) = 90°$. Рассмотрим случай, когда в углах поворота звеньев есть отклонения около 20° от вертикального положения (рис. 4).

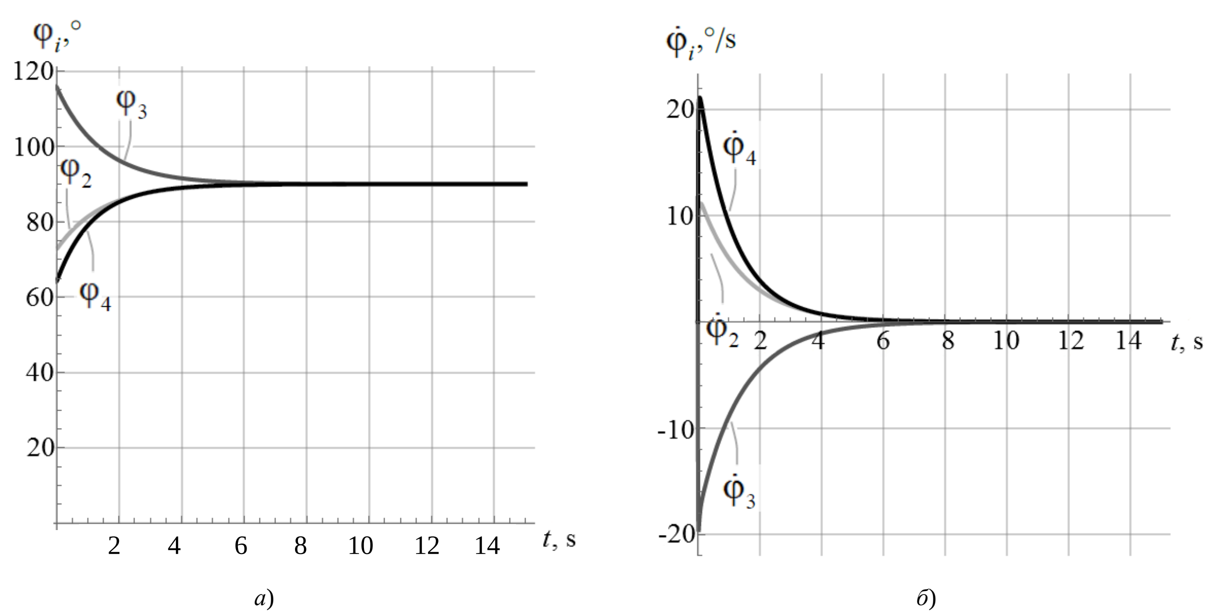


Рис. 4. Результаты моделирования стабилизации вертикального положения при начальных отклонениях от программного движения в углах поворота звеньев экзоскелета: *а* — углы поворота звеньев; б — угловые скорости звеньев

Из рис. 4 видно, что предложенное управление обеспечивает стабилизацию вертикального положения звеньев экзоскелета.

Для сравнения приведем результаты моделирования стабилизации вертикального положения при использовании следующих значений коэффициентов ПИД регулятора: $K_{Pi} = 1000\ \text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$, $K_{Ii} = 1000\ \text{Н}\cdot\text{м}$, $K_{Di} = 100\ \text{Н}\cdot\text{м/с}\ (i = 2,3,4)$ (рис. 5).

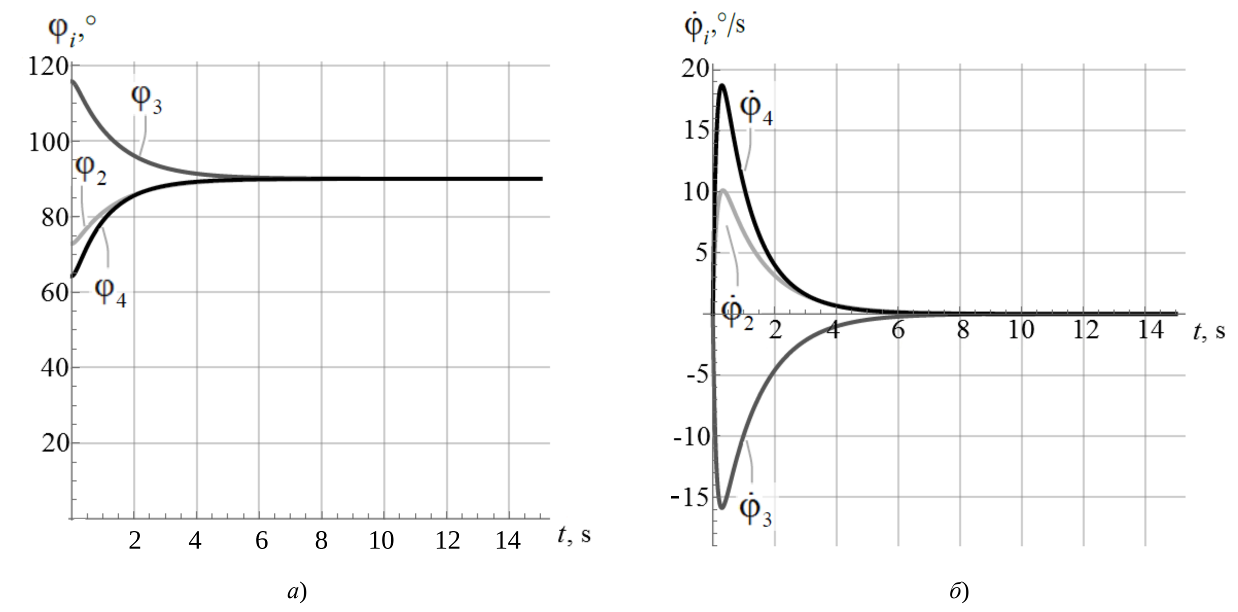


Рис. 5. Результаты моделирования стабилизации вертикального положения при начальных отклонениях от программного движения в углах поворота звеньев экзоскелета: *а* — углы поворота звеньев; *б* — угловые скорости звеньев

Из рис. 5 видно, что при использовании дифференциального звена ($K_{Di} \neq 0$) регулятора можно снизить выбросы в зависимостях угловых скоростей звеньев экзоскелета по сравнению со случаем $K_{Di} = 0$ (рис. 4 *б*).

Итак, рассмотрена возможность управления звеньями экзоскелета нижних конечностей с использованием показаний энкодеров и блоков инерциальных датчиков (микромеханических гироскопов и акселерометров). Результаты моделирования доказывают действенность данного подхода.

Обсуждение и заключения. Предлагаемое решение задачи управления движением экзоскелета может быть использовано в медицинских приложениях, в том числе для вертикализации пациентов с нарушениями функций опорно-двигательного аппарата.

Итак, данные блоков инерциальных датчиков можно использовать в задаче оценивания состояния звеньев экзоскелета — их угловых скоростей и ускорений. При этом нет необходимости в численном

дифференцировании измерительной информации энкодеров. Таким образом, в систему управления можно вводить обратную связь по угловым ускорениям, что позволяет улучшать переходные процессы при управлении движением экзоскелета.

Список литературы

1. Exoskeletons for Industrial Application and Their Potential Effects on Physical Work Load / M. P. De Looze, T. Bosch, F. Krause [et al.] // Ergonomics. — 2015. — Vol. 59. — P. 671–681. https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1081988

2. Геворкян, А. А. Роботизированная механотерапия: возможность применения экзоскелета для нижних конечностей у пациентов с нарушением функции ходьбы при рассеянном склерозе / А. А. Геворкян, С. В. Котов, В. Ю. Лиждвой // Альманах клинической медицины. — 2020. — Т. 48, № 1. — С. 7–12.

3. Экзоскелет — состояние проблемы и перспективы внедрения в систему абилитации и реабилитации инвалидов (аналитический обзор) / А. А. Воробьев, О. А. Засыпкина, П. С. Кривоножкина [и др.] // Вестник Волгоградского государственного медицинского университета. — 2015. — Вып. 2 (54). — С. 9–17.

4. Трехзвенная математическая модель для задачи стабилизации вертикальной позы человека / И. В. Новожилов, А. В. Терехов, А. В. Забелин [и др.] // Математическое моделирование движений человека в норме и при некоторых видах патологии. — Москва : Изд-во механико-математического факультета МГУ. — 2005. — С. 7–20.

5. Моделирование процессов вставания экзоскелета из положения сидя / С. И. Савин, С. Ф. Яцун, А. С. Яцун, Г. Я. Пановко // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2016. — Т. 3. — С. 19–24.

6. Saypulaev, M. R. Development of the Lower Extremity Exoskeleton Dynamics Model Using in the Task of the Patient Verticalization / M. R. Saypulaev, Yu. Yu. Zuev, G. R. Saypulaev // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2096. — Art. 0120421. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2096/1/012042

7. Zuev, Yu. Yu. Laws of Motion of the Lower Extremities and Structural-parametric Synthesis of Electro-Hydraulic Executive Modules of the Active Exoskeleton According to the Criterion of Energy Sufficiency / Yu. Yu. Zuev, M. R. Saypulaev, V. Doni // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2096. — Art. 012044. 10.1088/1742-6596/2096/1/012044

8. Яцун, С. Ф. Определение параметров приводов биоинженерных мехатронных модулей для экзоскелета нижних конечностей человека / С. Ф. Яцун, А. Н. Рукавицин // Известия Юго-Западного государственного университета. — 2012. — Т. 2, № 1. — С. 196–200.

9. Savin, S. I. Energy-Efficient Algorithm of Control of Exoskeleton Verticalization / S. I. Savin, A. S. Yatsun, S. F. Yatsun // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. — 2017. — Vol. 46. — P. 512–517.

10. A Robust Adaptive-Fuzzy-Proportional-Derivative Controller for a Rehabilitation Lower Limb Exoskeleton / N. Aliman, R. Ramli, S. M. Haris [et al.] // International Journal of Engineering Science and Technology. — 2022. — Vol. 35. — Art. 101097. 10.1016/j.jestch.2022.101097

11. Adaptive Particle Swarm Optimization of PID Gain Tuning for Lower-Limb Human Exoskeleton in Virtual Environment / M. S. Amiri, R. Ramli, M. F. Ibrahim [et al.] // Mathematics. — 2020. — Vol. 8. — Art. 2040. 10.3390/math8112040

12. Development and Control of an Electro-Hydraulic Actuator System for an Exoskeleton Robot / Dongyoung Lee, Buchun Song, Sang Yong Park, Yoon Su Baek // Applied Sciences. — 2019. — Vol. 9. — Art. 4295. 10.3390/app9204295

13. Lora-Millan, J. S. An IMUs-Based Extended Kalman Filter to Estimate Gait Lower Limb Sagittal Kinematics for the Control of Wearable Robotic Devices / J. S. Lora-Millan, A. F. Hidalgo, E. Rocon // IEEE Access. — 2021. — Vol. 9. — P. 144540–144554. 10.1109/ACCESS.2021.3122160

14. Minimizing Human-Exoskeleton Interaction Force by Using Global Fast Sliding Mode Control / Duong Mien Ka, Cheng Hong, Tran Huu Toan, Jing Qiu // International Journal of Control, Automation and Systems. — 2016. — Vol. 14. — P. 1064–1073. 10.1007/s12555-014-0395-7

15. Балакришнан, А. В. Теория фильтрации Калмана / А. В. Балакришнан. — Москва : Книга по требованию. — 2021. — 164 с.

Поступила в редакцию 11.07.2022
Поступила после рецензирования 01.08.2022
Принята к публикации 10.08.2022

Об авторах:

Сайпулаев Гасан Русланович, аспирант и ассистент кафедры «Робототехника, мехатроника, динамика и прочность машин» Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, РФ, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), ScopusID, ORCID, saypulaevgr@mail.ru

Сайпулаев Муса Русланович, аспирант кафедры «Робототехника, мехатроника, динамика и прочность машин» Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, РФ, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), ScopusID, ORCID, saypulaevmr@mail.ru

Меркурьев Игорь Владимирович, заведующий кафедрой «Робототехника, мехатроника, динамика и прочность машин» Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, РФ, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), доктор технических наук, доцент, ScopusID, ORCID, nir4s@ya.ru

Адамов Борис Игоревич, доцент кафедры «Робототехника, мехатроника, динамика и прочность машин» Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, РФ, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), кандидат физико-математических наук, доцент, ScopusID, ORCID, adamoff.b@yandex.ru

Гарсиа Ройлан Бельо, аспирант кафедры «Робототехника, мехатроника, динамика и прочность машин» Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, РФ, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), ORCID, roilangarcia76@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

Г. Р. Сайпулаев — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов. М. Р. Сайпулаев — формирование математической модели, проведение расчетов, подготовка текста. И. В. Меркурьев — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов. Б. И. Адамов — формирование основной концепции исследования научное руководство, анализ результатов исследований, корректировка выводов. Р. Б. Гарсиа — проведение расчетов, подготовка текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.